

TÍNH TOÁN CẦU KIẾN THÉP TẠO HÌNH NGUỘI CHỊU NÉN-UỐN BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHÂN TÍCH TRỰC TIẾP THEO TIÊU CHUẨN AISI S100-16

Vũ Quốc Anh^{a,*}, Hoàng Anh Toàn^b

^aKhoa Công trình, Đại học Kiến trúc Hà Nội, Km 10, đường Nguyễn Trãi, Thanh Xuân, Hà Nội

^bHệ V, Học viện Kỹ thuật Quân sự, đường Kiều Mai, quận Bắc Từ Liêm, Hà Nội

Nhận ngày 05/11/2020, Sửa xong 28/01/2021, Chấp nhận đăng 02/02/2021

Tóm tắt

Phương pháp phân tích trực tiếp được trình bày trong bài báo để phục vụ thiết kế cầu kiện thép tạo hình nguội chịu nén-uốn theo Tiêu chuẩn Mỹ AISI S100-16. Đồng thời, bài báo cũng giới thiệu quy trình tính toán cầu kiện thép tạo hình nguội bằng phương pháp cường độ trực tiếp (DSM) sử dụng phương pháp giải tích và phương pháp số bằng cách sử dụng phần mềm CUFSM để xác định ứng suất mất ổn định của tiết diện. Trong nghiên cứu này, ứng xử kết cấu của các cầu kiện dầm-cột chịu tải trọng lệch tâm được khảo sát dưới tác dụng đồng thời của tải trọng dọc trục và mô men uốn theo trục khỏe và trục yếu ($P-M_x-M_y$). Vì vậy, phần mềm CUFSM được sử dụng để xác định dạng mất ổn định chi phối (tức là mất ổn định tổng thể, cục bộ hoặc méo) và khả năng chịu lực của cầu kiện thép tạo hình nguội tiết diện chữ C có độ dài khác nhau chịu nén-uốn.

Từ khoá: thép tạo hình nguội; nén-uốn; phương pháp phân tích trực tiếp; AISI S100-16.

DETERMINATION OF COLD FORMED STEEL MEMBER UNDER COMPRESSION-BENDING USING DIRECT ANALYSIS METHOD ACCORDING TO AISI S100-16

Abstract

The Direct Analysis Method is presented in the article to serve the design of cold-formed steel members subjected to compression-bending according to American Standard AISI S100-16. Simultaneously, the article also introduces the process of calculating cold-formed steel structures by Direct strength method (DSM) using analytical and numerical methods using CUFSM software to determine sectional buckling stresses. In this study, the structural behaviour of eccentrically loaded beam-column members is investigated under simultaneous effects of axial loads and strong- and weak-axis bending ($P-M_x-M_y$). To this end, CUFSM software is used to determine the dominant buckling mode (i.e. global, local or distortional buckling) and load carrying capacity of cold-formed steel channel members with different lengths under compression-bending.

Keywords: cold-formed steel; compression-bending; direct analysis method; AISI S100-16.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2021-15\(1V\)-08](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2021-15(1V)-08) © 2021 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

1. Giới thiệu

Hiện nay, kết cấu thép tạo hình nguội đang được sử dụng rất phổ biến trên thế giới như Châu Âu, Mỹ, Úc, ... trong các công trình xây dựng dân dụng và công nghiệp như nhà ở thấp tầng, nhà kho, nhà thi đấu, ... bởi những ưu điểm vượt trội như trọng lượng nhẹ, dễ dàng trong sản xuất hàng loạt, vận chuyển, lắp dựng, cho phép tạo ra nhiều loại sản phẩm đa dạng về hình dạng và kích thước để đáp ứng

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: anhvq@hau.edu.vn (Anh, V. Q.)

nhu cầu sử dụng. Việc sử dụng kết cấu thép tạo hình nguội trong xây dựng bắt đầu từ năm 1850 ở cả Anh và Mỹ nhưng được sử dụng rộng rãi từ năm 1960 khi Mỹ xây dựng hàng loạt các công trình như văn phòng, khách sạn, bệnh viện, ... Tuy nhiên tại Việt Nam, loại kết cấu này mới bước đầu được ứng dụng và nhận được sự quan tâm của các nhà nghiên cứu [1, 2], nhà thiết kế thông qua việc sử dụng các sản phẩm của công ty nước ngoài (Zamil Steel, BlueScope). Ngay cả tiêu chuẩn thiết kế thép TCVN 5575:2012 [3] hiện hành cũng không áp dụng để thiết kế loại kết cấu này mà phải sử dụng các tiêu chuẩn nước ngoài. Năm 1946, Mỹ là nước đầu tiên trên thế giới ban hành Quy định kỹ thuật về thiết kế kết cấu thép tạo hình nguội mang tên "Specifications for the design of cold formed steel structural member" của Viện Sắt và Thép Hoa Kỳ (AISI). Các tiêu chuẩn liên tục được soát xét, chỉnh sửa và tái bản. Hiện tại, Tiêu chuẩn AISI S100-16 [4] được áp dụng tại Mỹ, Canada, Mexico đang sử dụng đồng thời hai phương pháp tính toán là phương pháp chiều rộng hữu hiệu (EWM) và phương pháp cường độ trực tiếp (DSM). Trong đó phương pháp DSM được đề xuất bởi Giáo sư Hancock (Australia); được phát triển, hoàn thiện bởi Giáo sư Schafer (Mỹ) và được đưa vào phần chính của Tiêu chuẩn AISI S100-16 [4] và AS/NZS 4600-2018 [5].

Cấu kiện chịu nén-uốn thường được gọi là cấu kiện dầm-cột. Cấu kiện bị uốn do tải trọng đặt lệch tâm, tải trọng ngang hoặc do tác dụng của mô men uốn. Những cấu kiện này thường được gặp trong kết cấu khung, vì kèo, tường, ... Các quy định thiết kế ban đầu của AISI cho tiết diện thép thành mỏng có trục đối xứng đơn chịu nén-uốn dựa trên nghiên cứu mở rộng về mất ổn định uốn-xoắn chịu tải trọng lệch tâm được thực hiện bởi Winter, Pekoz và Celebi [6, 7], ứng xử của cột tiết diện chữ C chịu tải trọng lệch tâm được nghiên cứu bởi Rhodes, Harvey [8] và Loughlan [9]. Năm 2007, Tiêu chuẩn AISI S100-2007 [10] đã sử dụng phương pháp phân tích đàn hồi bậc nhất để tính toán độ bền của cấu kiện chịu tải trọng nén dọc trục và uốn theo hai phương, đồng thời cũng giới thiệu phương pháp phân tích bậc hai là phương pháp tiếp cận phương pháp phân tích trực tiếp như một phương pháp tùy chọn để phân tích ổn định kết cấu. Năm 2016, Tiêu chuẩn AISI S100-16 [4] được thống nhất đưa vào ba phương pháp thiết kế ổn định kết cấu gồm phương pháp phân tích trực tiếp sử dụng phân tích đàn hồi bậc nhất khuếch đại, phương pháp phân tích đàn hồi bậc hai tường minh và phương pháp chiều dài hữu hiệu. Trong phân tích, tính toán và thiết kế kết cấu dầm-cột đòi hỏi khối lượng tính toán rất lớn do có sự tương tác giữa tải trọng dọc trục và mô men uốn. Hiện tại, Tiêu chuẩn Mỹ AISI S100-16 [4] và Tiêu chuẩn Úc AS/NZS 4600-2018 [5] đang sử dụng phương trình tương tác tuyến tính để kết hợp tải trọng dọc trục và mô men uốn tác dụng lên cấu kiện dầm-cột có kể đến sự làm việc phi tuyến của hệ kết cấu thông qua các hệ số khuếch đại.

Phương pháp phân tích trực tiếp được trình bày trong bài báo để phục vụ thiết kế cấu kiện thép tạo hình nguội chịu nén-uốn là phương pháp kết hợp sử dụng phân tích đàn hồi bậc nhất khuếch đại kết hợp với phương pháp cường độ trực tiếp theo Tiêu chuẩn Mỹ AISI S100-16 [4]. Quy trình tính toán được hỗ trợ bởi phần mềm phân tích ổn định đàn hồi CUFSM.

Sử dụng phương pháp và quy trình tính toán được giới thiệu để tính toán cho cấu kiện thép tạo hình nguội có tiết diện chữ C chịu nén-uốn. Đồng thời khảo sát sự tương tác giữa các dạng mất ổn định ảnh hưởng đến khả năng chịu lực của cấu kiện.

2. Phương pháp tính toán cầu kiện chịu nén-uốn

2.1. Phương pháp phân tích trực tiếp sử dụng phân tích đàn hồi bậc nhất khuếch đại

Nội lực (\bar{M}, \bar{P}) khi kể đến hiệu ứng bậc hai của tất cả các cầu kiện được xác định theo Mục C1.2.1.1 [4] như sau:

$$\bar{M} = B_1 \bar{M}_{nt} + B_2 \bar{M}_{lt} \quad (1)$$

$$\bar{P} = \bar{P}_{nt} + B_2 \bar{P}_{lt} \quad (2)$$

$$B_1 = C_m / (1 - \alpha \bar{P} / P_{e1}) \geq 1,0 \quad (3)$$

$$C_m = 0,6 - 0,4(M_1 / M_2) \quad (4)$$

$$P_{e1} = \pi^2 k_f / (K_1 L)^2 \quad (5)$$

$$B_2 = 1 / [1 - (\alpha \bar{P}_{story} / P_{e,story})] \geq 1,0 \quad (6)$$

$$P_{e,story} = R_M H \bar{F} / \Delta_F \quad (7)$$

$$R_M = 1,0 - 0,15(P_{mf} / \bar{P}_{story}) \quad (8)$$

trong đó \bar{M} là mô men kể đến hiệu ứng bậc hai; B_1 là hệ số kể đến hiệu ứng P - δ ; B_2 là hệ số kể đến hiệu ứng P - Δ ; \bar{M}_{nt} là mô men từ phân tích đàn hồi bậc nhất khi kết cấu bị hạn chế dịch chuyển ngang; \bar{M}_{lt} là mô men từ phân tích đàn hồi bậc nhất chỉ do dịch chuyển ngang của kết cấu; \bar{P} là lực dọc kể đến hiệu ứng bậc hai; \bar{P}_{nt} là lực dọc trực từ phân tích đàn hồi bậc nhất khi kết cấu bị hạn chế dịch chuyển ngang; \bar{P}_{lt} là lực dọc trực từ phân tích đàn hồi bậc nhất chỉ do dịch chuyển ngang của kết cấu; C_m là hệ số giả định khi khung không có dịch chuyển ngang; $\alpha = 1,00$ (LRFD hoặc LSD) hoặc $\alpha = 1,6$ (ASD); M_1 và M_2 lần lượt là mô men nhỏ hơn và lớn hơn tương ứng ở hai đầu cầu kiện được xác định từ phân tích đàn hồi bậc nhất; P_{e1} là lực tới hạn mất ổn định đàn hồi của cầu kiện trong mặt phẳng uốn; k_f là độ cứng chống uốn trong mặt phẳng uốn hiệu chỉnh; K_1 là hệ số chiều dài hiệu dụng; L là chiều dài không giằng của cầu kiện; \bar{P}_{story} là tổng tải trọng thẳng đứng của tầng; $P_{e,story}$ là tải trọng tới hạn gây mất ổn định đàn hồi của tầng theo hướng dịch chuyển đang xét; H là chiều cao tầng; \bar{F} là lực cắt tầng theo hướng dịch chuyển đang xét được tạo ra bởi các lực ngang; Δ_F là chuyển vị ngang giữa các tầng từ phân tích đàn hồi bậc nhất theo hướng dịch chuyển được xét đến do lực cắt tầng tạo ra; P_{mf} là tổng tải trọng thẳng đứng trong các cột của tầng đang xét.

Độ bền tính toán của cầu kiện được xác định theo các quy định của từng cầu kiện trong từng trường hợp tải trọng riêng biệt mà không cần xét thêm về sự ổn định tổng thể của hệ kết cấu.

2.2. Phương pháp cường độ trực tiếp

Phương pháp Cường độ trực tiếp (DSM) là phương pháp thay thế được đề cập trong Tiêu chuẩn AISI S100-16 [4] và cũng là một phương pháp thực nghiệm. Phương pháp này được phát triển vào những năm 1990 nhằm mục đích khắc phục những hạn chế của phương pháp EWM. Hancock và cs. [11] đã đề xuất phương pháp thiết kế mất ổn định méo của tiết diện thép tạo hình nguội, sau đó được phát triển và hoàn thiện bởi Schafer và Pekoz [12–14]. Khác với phương pháp EWM, DSM dựa trên ứng xử của toàn bộ cầu kiện thay vì ứng xử của tiết diện. Đầu vào của DSM là tải trọng gây mất ổn định đàn hồi và giới hạn chảy dẻo của vật liệu. Các dạng mất ổn định tương ứng với độ mảnh danh nghĩa của tiết diện, phụ thuộc vào ứng suất mất ổn định tuyến tính và giới hạn chảy của vật liệu.

Độ mảnh mất ổn định tổng thể:

$$\lambda_c = \sqrt{F_y / F_{cre}} \quad (9)$$

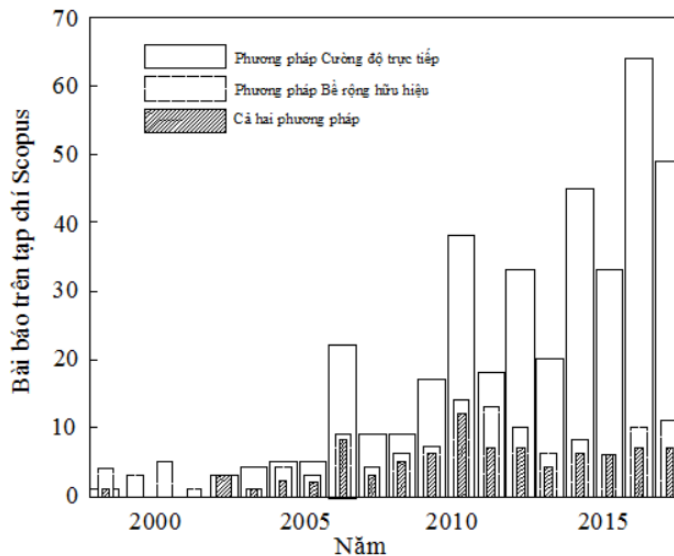
Độ mảnh mất ổn định cục bộ:

$$\lambda_l = \sqrt{F_y / F_{crl}} \quad (10)$$

Độ mảnh mất ổn định méo:

$$\lambda_d = \sqrt{F_y / F_{crd}} \quad (11)$$

trong đó F_y là giới hạn chảy; F_{cre} , F_{crl} và F_{crd} tương ứng là ứng suất mất ổn định tổng thể, ứng suất mất ổn định cục bộ và ứng suất mất ổn định méo. Độ mảnh danh nghĩa được sử dụng trực tiếp để tính toán cường độ mất ổn định theo các công thức trong Tiêu chuẩn AISI S100-16 [4]. Phương pháp DSM đã thể hiện nhiều ưu điểm so với phương pháp EWM [15], cho phép xác định khả năng chịu lực của cấu kiện một cách đơn giản đặc biệt cho các tiết diện có hình dạng phức tạp hay có nhiều sườn tăng cứng. Mặt khác, nó kể đến sự tương tác giữa các phần tử tấm phẳng trong phân tích mất ổn định tuyến tính nhờ giải pháp số mà phương pháp EWM không thể xét đến. DSM được hiệu chuẩn để áp dụng cho các tiết diện nhất định. Do đó, Tiêu chuẩn Mỹ AISI S100-16 đưa ra một danh mục các giới hạn về hình học và vật liệu như được chỉ ra ở Bảng B4.1-1 [4]. Danh mục này là một sự hạn chế cho phương pháp DSM, nhưng nó là bản chất của phương pháp thực nghiệm. Sự phát triển của phương pháp DSM được đánh giá qua số lượng các bài báo nghiên cứu trên tạp chí Scopus trong thời gian từ năm 1998÷2017 [16].



Hình 1. Các nghiên cứu về kết cấu thép tạo hình nguội trên tạp chí Scopus

a. Cấu kiện chịu nén

Độ bền dọc trục tiêu chuẩn của cấu kiện chịu nén có tiết diện không giảm yếu là giá trị nhỏ nhất của độ bền dọc trục tiêu chuẩn mất ổn định tổng thể (P_{ne}), độ bền dọc trục tiêu chuẩn mất ổn định cục bộ (P_{nl}) và độ bền dọc trục tiêu chuẩn mất ổn định méo (P_{nd}); được xác định theo Mục E2 đến Mục E4 Tiêu chuẩn AISI S100-16 [4].

- Độ bền dọc trục tiêu chuẩn mất ổn định tổng thể:

$$P_{ne} = A_g F_n \quad (12)$$

trong đó A_g là tổng diện tích của tiết diện; F_n là ứng suất nén.

$$F_n = (0,658^{\lambda_c^2})F_y; \quad \text{với } \lambda_c \leq 1,5; \quad (13)$$

$$F_n = \left(\frac{0,877}{\lambda_c^2} \right) F_y; \quad \text{với } \lambda_c > 1,5 \quad (14)$$

- Độ bền dọc trục tiêu chuẩn mất ổn định cục bộ:

$$P_{nl} = P_{ne}; \quad \text{với } \lambda_l \leq 0,776 \quad (15)$$

$$P_{nl} = \left[1 - 0,15 \left(\frac{P_{crl}}{P_{ne}} \right)^{0,4} \right] \left(\frac{P_{crl}}{P_{ne}} \right)^{0,4} P_{ne}; \quad \text{với } \lambda_l > 0,776 \quad (16)$$

trong đó P_{ne} là độ bền dọc trục tiêu chuẩn mất ổn định tổng thể; P_{crl} là tải trọng gây mất ổn định cục bộ ở trạng thái đàn hồi được xác định theo Phụ lục 2 Tiêu chuẩn AISI S100-16 [4].

- Độ bền dọc trục tiêu chuẩn mất ổn định méo:

$$P_{nd} = P_y; \quad \text{với } \lambda_d \leq 0,561 \quad (17)$$

$$P_{nd} = \left[1 - 0,25 \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0,6} \right] \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0,6} P_y; \quad \text{với } \lambda_d > 0,561 \quad (18)$$

$$P_y = A_g F_y \quad (19)$$

trong đó P_{crd} là tải trọng gây mất ổn định méo ở trạng thái đàn hồi được xác định theo Phụ lục 2 Tiêu chuẩn AISI S100-16 [4]. Các biến khác được định nghĩa ở phần trên.

- Độ bền dọc trục tính toán là $\phi_c P_n$ hoặc P_n / Ω_c với hệ số $\phi_c = 0,85$ (LRFD) $\phi_c = 0,8$ (LSD) hoặc $\Omega_c = 1,80$ (ASD).

b. Cầu kiện chịu uốn

Độ bền uốn tiêu chuẩn của cầu kiện chịu uốn có tiết diện không giảm yếu là giá trị nhỏ nhất của độ bền uốn tiêu chuẩn mất ổn định tổng thể (M_{ne}), độ bền uốn tiêu chuẩn mất ổn định cục bộ (M_{nl}) và độ bền uốn tiêu chuẩn mất ổn định méo (M_{nd}); được xác định theo Mục F2 đến Mục F4 Tiêu chuẩn AISI S100-16 [4].

- Độ bền uốn tiêu chuẩn mất ổn định tổng thể:

$$M_{ne} = S_f F_n \leq M_y; \quad M_y = S_{fy} F_y \quad (20)$$

trong đó S_f là mô đun đàn hồi của toàn bộ tiết diện không giảm yếu đối với trục biên chịu nén; S_{fy} là mô đun đàn hồi của toàn bộ tiết diện không giảm yếu đối với trục biên tại ứng suất chảy; F_y là giới hạn chảy của vật liệu; F_n là ứng suất tối hạn.

$$F_n = F_y; \quad \text{với } F_{cre} \geq 2,78 F_y \quad (21)$$

$$F_n = \frac{10}{9} F_y \left[1 - \frac{10 F_y}{36 F_{cre}} \right]; \quad \text{với } 2,78 F_y > F_{cre} > 0,56 F_y \quad (22)$$

$$F_n = F_{cre}; \quad \text{với } F_{cre} \leq 0,56 F_y \quad (23)$$

trong đó F_{cre} là ứng suất mất ổn định ngang-xoắn đàn hồi được xác định theo Mục F2.1.1 đến Mục F2.1.5 hoặc Phụ lục 2 của Tiêu chuẩn AISI S100-16 [4].

- Độ bền uốn tiêu chuẩn mất ổn định cục bộ:

$$M_{nl} = M_{ne}; \quad \text{với } \lambda_l \leq 0,776 \quad (24)$$

$$M_{nl} = \left[1 - 0,15 \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0,4} \right] \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0,4} M_{ne}; \quad \text{với } \lambda_l > 0,776 \quad (25)$$

trong đó M_{ne} là độ bền uốn tiêu chuẩn mất ổn định tổng thể như được chỉ ra ở công thức (19); M_{crl} là độ bền uốn mất ổn định cục bộ ở trạng thái đàn hồi được xác định theo Phụ lục 2 Tiêu chuẩn AISI S100-16 [4].

- Độ bền uốn tiêu chuẩn mất ổn định méo

$$M_{nd} = M_y; \quad \text{với } \lambda_d \leq 0,673 \quad (26)$$

$$M_{nd} = \left[1 - 0,22 \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0,5} \right] \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0,5} M_y; \quad \text{với } \lambda_d > 0,673 \quad (27)$$

$$\lambda_d = \sqrt{M_y / M_{crd}}; \quad M_y = S_{fy} F_y; \quad M_{crd} = S_f F_{crd} \quad (28)$$

trong đó F_{crd} là ứng suất mất ổn định méo được xác định theo Phụ lục 2 Tiêu chuẩn AISI S100-16 [4]. Các biến khác được định nghĩa ở phần trên.

- Độ bền uốn tính toán là $\phi_b M_n$ hoặc M_n / Ω_b với hệ số $\phi_b = 0,90$ (LRFD, LSD) hoặc $\Omega_b = 1,67$ (ASD).

c. Cầu kiện chịu tác dụng của tổ hợp tải trọng nén dọc trục và uốn

Cầu kiện phải thỏa mãn phương trình sau:

$$\frac{\bar{P}}{P_a} + \frac{\bar{M}_x}{M_{ax}} + \frac{\bar{M}_y}{M_{ay}} \leq 1,0 \quad (29)$$

trong đó \bar{P} là lực dọc; \bar{M}_x, \bar{M}_y là mô men; P_a là độ bền dọc trục tính toán và M_{ax}, M_{ay} là độ bền uốn tính toán được xác định theo Mục 2.2(a) và (b).

3. Phần mềm CUFSM

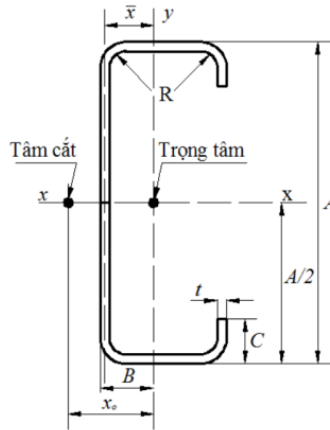
Phương pháp dải hữu hạn (Finite Strip Method - FSM) là một trường hợp đặc biệt của phương pháp số được sáng tạo bởi Cheung [17], Cheung đã sử dụng lý thuyết tấm Kirchhoff để xây dựng các dải hữu hạn. Đây là một phương pháp rất hiệu quả và phổ biến để phân tích ổn định đàn hồi cho cầu kiện thép tạo hình nguội. AISI đã tài trợ để phát triển phương pháp này. Kết quả là sự ra đời của phần mềm CUFSM với việc dùng phương pháp FSM để phân tích ổn định đàn hồi cho tiết diện bất kỳ. CUFSM khảo sát được cầu kiện chịu nén, uốn, ... tự nhận biết các dạng mất ổn định tổng thể, mất ổn định cục bộ, mất ổn định méo và các trường hợp đặc biệt khác. Phần mềm CUFSM đưa ra kết quả phân tích mất ổn định của tiết diện dưới dạng là một đường cong “Signature” thể hiện được mối quan hệ giữa ứng suất mất ổn định và chiều dài nửa bước sóng của các dạng mất ổn định. Với mỗi tiết diện cho một đường cong riêng biệt đặc trưng. Giá trị ứng suất mất ổn định cục bộ và mất ổn định méo từ phần mềm CUFSM được dùng để xác định khả năng chịu lực của cầu kiện thép tạo hình nguội bằng phương pháp Cường độ trực tiếp như trình bày ở phần trên.

4. Khảo sát cầu kiện thép tạo hình nguội chịu nén-uốn

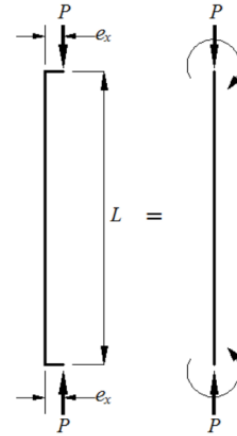
4.1. Xác định khả năng chịu lực của cầu kiện tiết diện chữ C chịu nén-uốn

Xác định khả năng chịu lực của cầu kiện thép tạo hình nguội tiết diện C20024 [18] có hai đầu liên kết khớp đối với cả uốn và xoắn, chiều dài 3,0 m chịu tải trọng nén lệch tâm ở hai đầu có độ lệch tâm theo hai phương (theo phương trục x là $e_x = -5$ cm; theo phương trục y là $e_y = 5$ cm) ($F_y = 345$ MPa).

$A = 203$ (mm)
 $B = 76$ (mm)
 $C = 21$ (mm)
 $t = 2,4$ (mm)
 $R = 5$ (mm)
 $E = 203000$ (MPa)
 $G = 78076,92$ (MPa)
 $\mu = 0,3$



Hình 2. Đặc trưng tiết diện chữ C



Hình 3. Sơ đồ kết cấu

a. Đặc trưng tiết diện

Bảng 1. Đặc trưng hình học của tiết diện C20024 [18]

Kích thước (mm)				A_g (mm ²)	Mô men quán tính (10 ⁶ mm ⁴)		x_0 (mm)	Mô đun chống uốn (10 ³ mm ³)		Bán kính quán tính (mm)		Hằng số xoắn St. Venant J (mm ⁴)	Hằng số xoắn vòng C_w (10 ⁶ mm ⁶)	j (mm)
A	B	C	t		I_x	I_y		S_x	S_y	r_x	r_y			
203	76	21	2,4	904,0	5,69	0,681	54,4	56,0	12,7	79,3	27,4	1740	5540	114,28

b. Tải trọng dọc trục và mô men uốn

Gọi P là tải trọng dọc trục cần được xác định (đơn vị N); Giá trị độ lớn mô men uốn do tải trọng dọc trục đặt lệch tâm gây ra $M_x = P.e_y = 50P$ (Nmm), $M_y = P.e_x = 50P$ (Nmm).

c. Độ bền nén tiêu chuẩn của cầu kiện chịu nén

- Độ bền nén tiêu chuẩn mất ổn định tổng thể:

Ứng suất mất ổn định uốn đàn hồi:

$$F_{cre1} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} = 167,700 \text{ (MPa)} \quad (30)$$

Ứng suất mất ổn định uốn-xoắn đàn hồi:

$$F_{cre2} = \frac{1}{2\beta} \left[(\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta\sigma_{ex}\sigma_t} \right] = 146,304 \text{ (MPa)} \quad (31)$$

$$\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(K_x L_x / r_x)^2} = 1401,190 \text{ (MPa)}; \text{ với } \beta = 1 - (x_0 / r_0)^2 = 0,702 \quad (32)$$

$$r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2} = 100,034 \text{ (mm)} \quad (33)$$

$$\sigma_t = \frac{1}{A_g r_0^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 E C_w}{(K_t L_t)^2} \right] = 151,348 \text{ (MPa)} \quad (34)$$

$$F_{cre} = \min(F_{cre1}; F_{cre2}) = 146,304 \text{ (MPa)}; \quad \lambda_c = \sqrt{F_y / F_{cre}} = 1,536 > 1,50$$

$$F_n = \left(\frac{0,877}{\lambda_c^2} \right) F_y = 128,309 \text{ (MPa)}; \quad P_{ne} = A_g F_n = 115991 \text{ (N)}$$

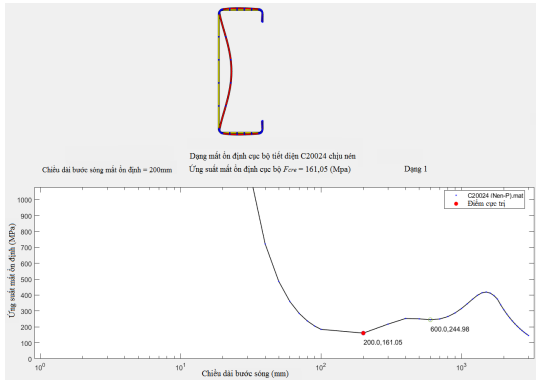
- Độ bền nén tiêu chuẩn mất ổn định cục bộ:

Phương pháp giải tích: được xác định theo [10] như sau:

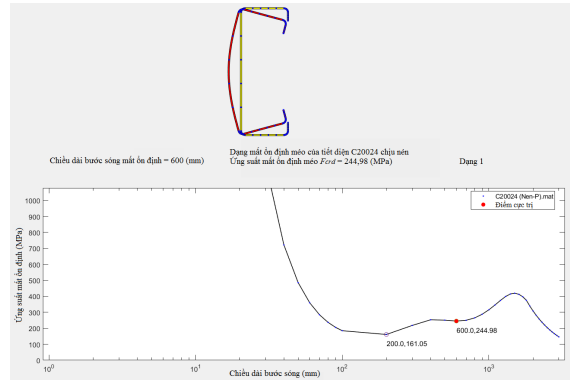
$$F_{crl_f_l} = k_{f_l} \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 = 831,380 \text{ (MPa)}; \text{ với } k_{f_l} = 4,2615$$

$$F_{crl_f_w} = k_{f_w} \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 = 139,757 \text{ (MPa)}; \text{ với } k_{f_w} = 0,7164$$

$$F_{crl} = \min(F_{crl_f_l}; F_{crl_f_w}) = 139,757 \text{ (MPa)}$$



Hình 4. Ứng suất mất ổn định cục bộ



Hình 5. Ứng suất mất ổn định méo

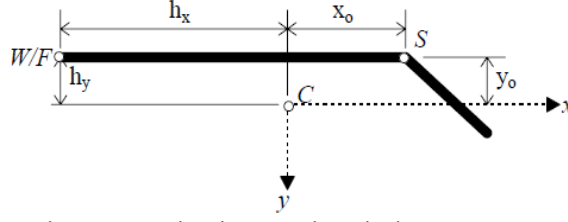
Phương pháp số: Sử dụng phần mềm CUFSM, kết quả như Hình 4.

Ứng suất mất ổn định cục bộ $F_{crl} = 161,05 \text{ (MPa)}$ Ta thấy sai lệch về kết quả tính toán ứng suất mất ổn định cục bộ giữa phương pháp giải tích so với phương pháp số là 13,22%, do vậy ta sử dụng kết quả tính toán của phương pháp số là đảm bảo độ tin cậy.

$$P_{crl} = A_g F_{crl} = 145,589 \text{ (N)}; \quad \lambda_l = \sqrt{P_{ne} / P_{crl}} = 0,893 > 0,776; \quad P_{nl} = 106162 \text{ (N)}$$

- Độ bền nén tiêu chuẩn mất ổn định méo:

Phương pháp giải tích: Đặc trưng hình học của cánh nén được xác định theo [19] (Hình 6)



Hình 6. Kích thước hình học của cánh

$$\begin{aligned}
 h_0 &= 203 \text{ (mm)}; & b_0 &= 76 \text{ (mm)}; & d_0 &= 21 \text{ (mm)}; & h &= 200,6 \text{ (mm)}; \\
 b &= 73,6 \text{ (mm)}; & d &= 19,8 \text{ (mm)}; & A_f &= 224,16 \text{ (mm}^2\text{)} \\
 I_{xf} &= 5,307.10^3 \text{ (mm}^4\text{)}; & I_{yf} &= 1,304.10^5 \text{ (mm}^4\text{)}; & I_{xyf} &= 1,364.10^4 \text{ (mm}^4\text{)}; \\
 x_{of} &= 28,999 \text{ (mm)}; & y_{of} &= -2,099 \text{ (mm)}; & h_{xf} &= -44,601 \text{ (mm)}; \\
 J_f &= 430,387 \text{ (mm}^4\text{)}; & C_{wf} &= 0 \text{ (mm}^6\text{)}
 \end{aligned}$$

$$L_{crd} = \left\{ \frac{6\pi^4 h_0 (1 - \mu^2)}{t^3} \left[I_{xf}(x_{of} - h_{xf})^2 + C_{wf} - \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}}(x_{of} - h_{xf})^2 \right] \right\}^{1/4} \quad (35)$$

$$L_{crd} = 636,544 \text{ (mm)} \Rightarrow L = L_m = L_{crd} = 636,544 \text{ (mm)}$$

$$k_{\phi fe} = \left(\frac{\pi}{L} \right)^4 \left[EI_{xf}(x_{of} - h_{xf})^2 + EC_{wf} - E \frac{I_{xyf}^2}{I_{yf}}(x_{of} - h_{xf})^2 \right] + \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 GJ_f = 3,350.10^3 \text{ (N)} \quad (36)$$

$$k_{\phi we} = \frac{Et^3}{6h_0(1 - \mu^2)} = 2,532.10^3 \text{ (N)} \quad (37)$$

$$\tilde{k}_{\phi fg} = \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \left\{ A_f \left[(x_{of} - h_{xf})^2 \left(\frac{I_{xyf}}{I_{yf}} \right)^2 - 2y_{of}(x_{of} - h_{xf}) \left(\frac{I_{xyf}}{I_{yf}} \right) + h_{xf}^2 + y_{of}^2 \right] + I_{xf} + I_{yf} \right\} = 14,692 \text{ (mm}^2\text{)} \quad (38)$$

$$\tilde{k}_{\phi wg} = \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \frac{th_0^3}{60} = 8,1501 \text{ (mm}^2\text{)} \quad (39)$$

$$F_{crd} = \frac{k_{\phi fe} + k_{\phi we} + k_{\phi}}{\tilde{k}_{\phi fg} + \tilde{k}_{\phi wg}} = 257,508 \text{ (MPa)} \quad (40)$$

- Phương pháp số: Sử dụng phần mềm CUFSM kết quả trên Hình 5.

Ứng suất mất ổn định méo $F_{crd} = 244,980 \text{ (MPa)}$. Ta thấy sai lệch về kết quả tính toán ứng suất mất ổn định méo giữa phương pháp giải tích so với phương pháp số là 5,11%, do vậy ta sử dụng kết quả tính toán của phương pháp số là đảm bảo độ tin cậy.

$$\lambda_d = \sqrt{P_y/P_{crd}} = 1,187 > 0,561; \quad P_{nd} = 202264 \text{ (N)}$$

- Độ bền nén tiêu chuẩn của cấu kiện chịu nén:

$$P_n = \min(P_{ne}, P_{nl}, P_{nd}) = 106162 \text{ (MPa)}$$

d. Độ bền uốn tiêu chuẩn của cầu kiện chịu uốn quanh trục x

- Độ bền uốn tiêu chuẩn mất ổn định tổng thể:

Ứng suất mất ổn định tổng thể:

$$F_{cre1} = \frac{C_b r_0 A_g}{S_f} \sqrt{\sigma_{ey} \sigma_t} = 257,27 \text{ (MPa)} \quad (41)$$

trong đó $C_b = 1,0$; $r_0 = 100,034 \text{ (mm)}$; $A_g = 904,0 \text{ (mm}^2\text{)}$; $S_f = S_x = 56000 \text{ (mm}^3\text{)}$; $\sigma_{ey} = 167,70 \text{ (MPa)}$; $\sigma_t = 151,348 \text{ (MPa)}$;

$$F_n = 240,540 \text{ (MPa)}; M_{ne} = S_f F_n = 13470249 \text{ (Nmm)}$$

- Độ bền uốn tiêu chuẩn mất ổn định cục bộ:

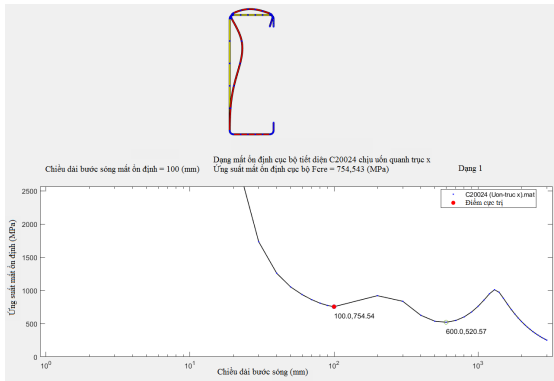
Phương pháp giải tích: được xác định theo [20] như sau:

$$F_{crl_f_l} = k_{f_l} \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 = 838,650 \text{ (MPa)}; \text{ với } k_{f_l} = 4,299$$

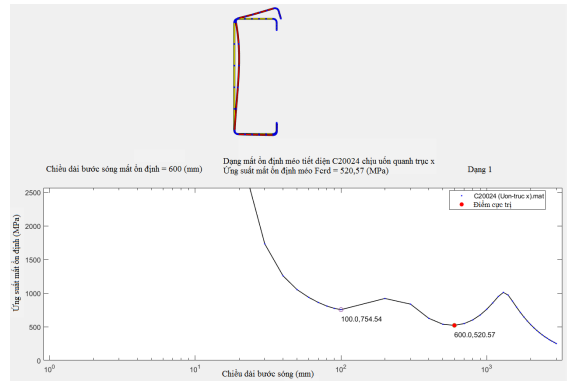
$$F_{crl_f_w} = k_{f_w} \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 = 709,084 \text{ (MPa)}; \text{ với } k_{f_w} = 3,635$$

$$F_{crl} = \min(F_{crl_f_l}; F_{crl_f_w}) = 709,084 \text{ (MPa)}$$

Phương pháp số: Sử dụng phần mềm CUFSM kết quả như Hình 7.



Hình 7. Ứng suất mất ổn định cục bộ



Hình 8. Ứng suất mất ổn định méo

Ứng suất mất ổn định cục bộ $F_{crl} = 754,543 \text{ (MPa)}$. Ta thấy sai lệch về kết quả tính toán ứng suất mất ổn định cục bộ giữa phương pháp giải tích so với phương pháp số là 6,02%, do vậy ta sử dụng kết quả tính toán của phương pháp số là đảm bảo độ tin cậy.

$$M_{crl} = S_f F_{crl} = 42254240 \text{ (N)}$$

$$\lambda_l = \sqrt{M_{ne}/M_{crl}} = 0,565 < 0,776; \quad M_{nl} = M_{ne} = 13470249 \text{ (Nmm)}$$

- Độ bền uốn tiêu chuẩn mất ổn định méo:

Phương pháp giải tích: Tương tự cầu kiện chịu nén ta có kết quả sau:

$$L = L_m = L_{crl} = 575,484 \text{ (mm)}; \quad k_{\phi fe} = 4,791.10^3 \text{ (N)}; \quad k_{\phi we} = 4,298.10^3 \text{ (N)};$$

$$\tilde{k}_{\phi fg} = 17,975 \text{ (mm)}; \quad \tilde{k}_{\phi wg} = 1,695 \text{ (mm)}; \quad F_{crl} = 462,079 \text{ (Nmm)}$$

- Phương pháp số: Sử dụng phần mềm CUFSM, kết quả trên Hình 8.

Ứng suất mất ổn định méo: $F_{crd} = 520,570$ (Nmm).

Ta thấy sai lệch về kết quả tính toán ứng suất mất ổn định méo giữa phương pháp giải tích so với phương pháp số là 11,31%, do vậy ta sử dụng kết quả tính toán của phương pháp số là đảm bảo độ tin cậy.

$$M_{crd} = S_f F_{crd} = 29151920 \text{ (Nmm)}$$

$$\lambda_d = \sqrt{M_y / M_{crd}} = 0,814 > 0,673; \quad M_{nd} = 17318731 \text{ (Nmm)}$$

- Độ bền uốn tiêu chuẩn của cầu kiện chịu uốn:

$$M_{nx} = \min(M_{ne}, M_{nl}, M_{nd}) = 13470249 \text{ (Nmm)}$$

e. Độ bền uốn tiêu chuẩn của cầu kiện chịu uốn quanh trục y

- Độ bền uốn tiêu chuẩn mất ổn định tổng thể:

Ứng suất mất ổn định ngang-xoắn đàn hồi:

$$F_{cre} = \frac{C_s A_g \sigma_{ex}}{C_{TF} S_f} \left[j + C_s \sqrt{j^2 + r_0^2 \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_{ex}} \right)} \right] = 1865,137 \text{ (MPa)} \quad (42)$$

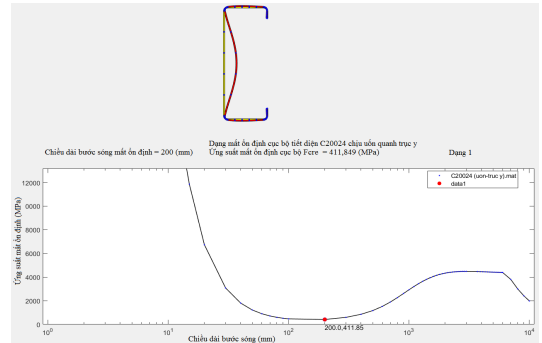
trong đó $C_s = -1,0$; $C_{TF} = 1,0$; $A_g = 904,214$ (mm²); $\sigma_{ex} = 1401,190$ (MPa); $\sigma_t = 151,348$ (MPa); $r_0 = 100,034$ (mm); $S_f = S_y = 12700$ (mm³);

$$F_n = 304,147 \text{ (MPa)}; \quad M_{ne} = S_f F_n = 3862673 \text{ (MPa)}$$

- Độ bền uốn tiêu chuẩn mất ổn định cục bộ: sử dụng phương pháp số. Phần mềm CUFSM cho kết quả trên Hình 9: $F_{crl} = 411,849$ (MPa); $M_{crl} = S_f F_{crl} = 5230482$ (N); $\lambda_l = \sqrt{M_{ne} / M_{crl}} = 0,859 > 0,776$; $M_{nl} = 3622215$ (Nmm)

Kết quả tính toán bằng phần mềm CUFSM cho thấy đường cong chữ ký chỉ nhận dạng một điểm cực trị tương ứng với giá trị ứng suất mất ổn định cục bộ, nên ta không cần xét đến trường hợp mất ổn định méo.

- Độ bền uốn tiêu chuẩn của cầu kiện chịu uốn quanh trục y



Hình 9. Ứng suất mất ổn định cục bộ

$$M_{ny} = \min(M_{ne}, M_{nl}) = 3622215 \text{ (Nmm)}$$

f. Xác định khả năng chịu lực của cầu kiện

Giả thiết cột không cho phép có chuyển vị theo phương ngang tại các gối đỡ nên hệ số $B_2 = 1$. Ngoài ra, $\bar{P}_{lt} = 0$ và $\bar{M}_{lt} = 0$.

$$\begin{aligned}\bar{P} &= \bar{P}_{nt} = P; \quad \bar{M}_{ntx} = \bar{M}_{nty} = 50P; \quad C_m = 0,6 - 0,4 \left(\frac{M_1}{M_2} \right) = 1,0; \\ P_{e1x} &= \pi^2 k_{fx} / (K_1 L)^2 = 151600 \text{ (N) với } k_{fx} = EI_y, K_1 = 1,0 \text{ và } L = 3000 \text{ (mm)} \\ P_{e1y} &= \pi^2 k_{fy} / (K_1 L)^2 = 1266676 \text{ (N) với } k_{fy} = EI_x, K_1 = 1,0 \text{ và } L = 3000 \text{ (mm)} \\ B_{1x} &= \frac{C_m}{1 - \alpha \bar{P} / P_{e1x}} = \frac{1,0}{1 - 1,6.P/151600}; \quad B_{1y} = \frac{C_m}{1 - \alpha \bar{P} / P_{e1y}} = \frac{1,0}{1 - 1,6.P/1266676} \\ \bar{M}_x &= B_{1x} M_{ntx} = \frac{1}{1 - 1,6.P/151400} 50P; \quad \bar{M}_y = B_{1y} M_{nty} = \frac{1}{1 - 1,6.P/1266676} 50P\end{aligned}$$

- Kiểm tra tương tác dầm-cột theo phương trình:

$$\begin{aligned}\bar{P}/P_a + \bar{M}_x/M_{ax} + \bar{M}_y/M_{ay} &\leq 1,0 \\ P_a &= P_n/\Omega_c = 58979 \text{ (N)}; \quad M_{ax} = M_{nx}/\Omega_b = 8066017 \text{ (Nmm)} \text{ (ASD [4])} \\ M_{ay} &= M_{ny}/\Omega_b = 2168991 \text{ (Nmm)} \text{ (ASD [4])}\end{aligned}$$

Thay vào phương trình tương tác ta có nghiệm $P = 19116 \text{ (N)}$

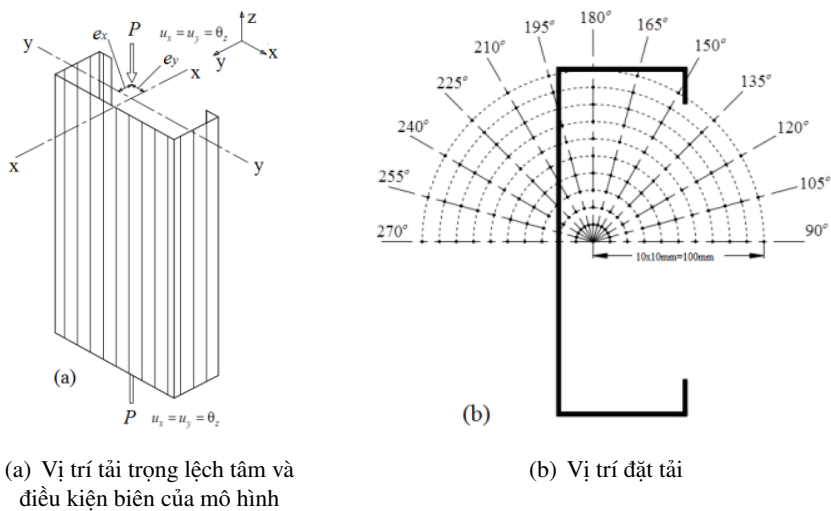
- Kiểm tra dầm-cột tại các điểm giằng sử dụng tải trọng $P = 19116 \text{ (N)}$.

$$\bar{P} = 19116 \text{ (N)}; \quad \bar{M}_{ntx} = \bar{M}_{nty} = 995800 \text{ (Nmm)}; \quad P_{ao} = A_g F_y = 311880 \text{ (N)}$$

Ta có $\bar{P}/P_{ao} + \bar{M}_x/M_{ax} + \bar{M}_y/M_{ay} = 0,620 < 1,0$ do vậy tại các điểm giằng đảm bảo khả năng chịu lực. Do đó khả năng chịu lực của cầu kiện là $P = 19116 \text{ (N)}$.

4.2. Khảo sát khả năng chịu lực của cầu kiện chịu nén-uốn

a. Trường hợp thay đổi vị trí đặt tải trọng nén dọc trục



Hình 10. Mô hình khảo sát cầu kiện chịu nén - uốn

Ta xét bài toán với cấu kiện chịu nén lệch tâm theo 2 phương trục x và y với độ lệch tâm tương ứng là e_x, e_y ; cấu kiện có hai đầu liên kết khớp đơn giản, chiều dài $L = 3,0$ (m) ($u_x = u_y = \theta_z$). Từ Hình 10(b), ta xác định vị trí của các điểm đặt lực tập trung và độ lệch tâm d của vị trí đặt lực tập trung so với trọng tâm của tiết diện. Kết quả tính toán được thể hiện ở Bảng 2 và 3.

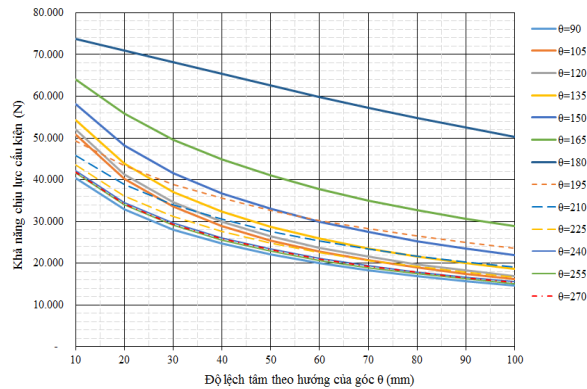
Bảng 2. Vị trí đặt lực và độ lệch tâm của điểm đặt lực

Góc (độ)	Hướng lệch tâm	Độ lệch tâm e (mm)									
		e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	e_7	e_8	e_9	e_{10}
90°	e_x	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	e_y	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
105°	e_x	9,66	19,32	28,98	38,64	48,30	57,96	67,61	77,27	86,93	96,59
	e_y	2,59	5,18	7,76	10,35	12,94	15,53	18,12	20,71	23,29	25,88
120°	e_x	8,66	17,32	25,98	34,64	43,30	51,96	60,62	69,28	77,94	86,60
	e_y	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00	45,00	50,00
135°	e_x	7,07	14,14	21,21	28,28	35,36	42,43	49,50	56,57	63,64	70,71
	e_y	7,07	14,14	21,21	28,28	35,36	42,43	49,50	56,57	63,64	70,71
150°	e_x	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00	45,00	50,00
	e_y	8,66	17,32	25,98	34,64	43,30	51,96	60,62	69,28	77,94	86,60
165°	e_x	2,59	5,18	7,76	10,35	12,94	15,53	18,12	20,71	23,29	25,88
	e_y	9,66	19,32	28,98	38,64	48,30	57,96	67,61	77,27	86,93	96,59
180°	e_x	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	e_y	10,00	20,00	30,00	40,00	50,00	60,00	70,00	80,00	90,00	100,00
195°	e_x	-2,59	-5,18	-7,76	-10,35	-12,94	-15,53	-18,12	-20,71	-23,29	-25,88
	e_y	9,66	19,32	28,98	38,64	48,30	57,96	67,61	77,27	86,93	96,59
210°	e_x	-5,00	-10,00	-15,00	-20,00	-25,00	-30,00	-35,00	-40,00	-45,00	-50,00
	e_y	8,66	17,32	25,98	34,64	43,30	51,96	60,62	69,28	77,94	86,60
225°	e_x	-7,07	-14,14	-21,21	-28,28	-35,36	-42,43	-49,50	-56,57	-63,64	-70,71
	e_y	7,07	14,14	21,21	28,28	35,36	42,43	49,50	56,57	63,64	70,71
240°	e_x	-8,66	-17,32	-25,98	-34,64	-43,30	-51,96	-60,62	-69,28	-77,94	-86,60
	e_y	5,00	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00	45,00	50,00
255°	e_x	-9,66	-19,32	-28,98	-38,64	-48,30	-57,96	-67,61	-77,27	-86,93	-96,59
	e_y	2,59	5,18	7,76	10,35	12,94	15,53	18,12	20,71	23,29	25,88
270°	e_x	-10,00	-20,00	-30,00	-40,00	-50,00	-60,00	-70,00	-80,00	-90,00	-100,00
	e_y	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Bảng 3. Khả năng chịu lực của cấu kiện dài 3,0 m

d (mm)	Khả năng chịu lực cấu kiện (N)												
	$\theta = 90^\circ$	$\theta = 105^\circ$	$\theta = 120^\circ$	$\theta = 135^\circ$	$\theta = 150^\circ$	$\theta = 165^\circ$	$\theta = 180^\circ$	$\theta = 195^\circ$	$\theta = 210^\circ$	$\theta = 225^\circ$	$\theta = 240^\circ$	$\theta = 255^\circ$	$\theta = 270^\circ$
10	40,276	40,170	40,752	42,084	44,305	47,699	52,949	47,410	43,869	41,562	40,174	39,556	39,641
20	32,845	32,656	33,277	34,806	37,489	41,891	49,695	41,150	36,943	34,180	32,600	31,943	32,104
30	28,092	27,855	28,453	30,001	32,801	37,590	46,798	37,149	32,219	29,350	27,759	27,125	27,329
40	24,683	24,418	24,982	26,493	29,287	34,207	44,212	33,745	28,697	25,844	24,295	23,698	23,927
50	22,079	21,799	22,327	23,784	26,521	31,446	41,891	30,977	25,936	23,149	21,660	21,101	21,343
60	20,010	19,722	20,216	21,612	24,270	29,137	39,800	28,668	23,696	20,996	19,572	19,048	19,297
70	18,317	18,027	18,490	19,825	22,394	27,168	37,907	26,704	21,835	19,230	17,871	17,379	17,630
80	16,902	16,612	17,047	18,324	20,802	25,464	36,186	25,008	20,259	17,750	16,453	15,990	16,240
90	15,699	15,411	15,822	17,042	19,432	23,973	34,614	23,525	18,905	16,490	15,251	14,814	15,062
100	14,662	14,378	14,766	15,935	18,237	22,655	33,174	22,217	17,727	15,403	14,218	13,805	14,049

Kết quả được thể hiện trên biểu đồ trên Hình 11.



Hình 11. Khả năng chịu lực cầu kiện chịu nén-uốn có chiều dài $L = 3$ m

Nhận xét: Khi độ lệch tâm càng lớn thì khả năng chịu lực của cầu kiện càng giảm do mô men được tạo ra bởi tải trọng lệch tâm càng lớn. Mặt khác khả năng chịu lực của cầu kiện chịu nén lệch tâm tạo ra mô men gây nén bản mép cao hơn trung bình 1,03 lần khi mô men gây kéo bản mép của tiết diện và đạt giá trị lớn nhất khi tải trọng trực chỉ gây ra mô men uốn đối với trục khỏe (trục x).

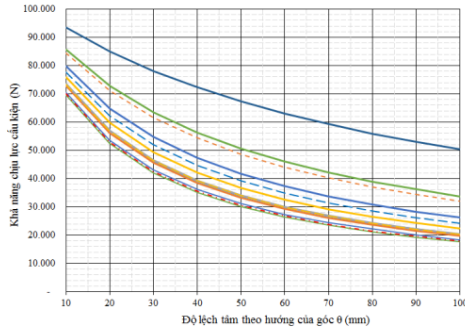
b. Trường hợp thay đổi độ dài cầu kiện

Bảng 4. Khả năng chịu lực của cầu kiện dài 1,0 m

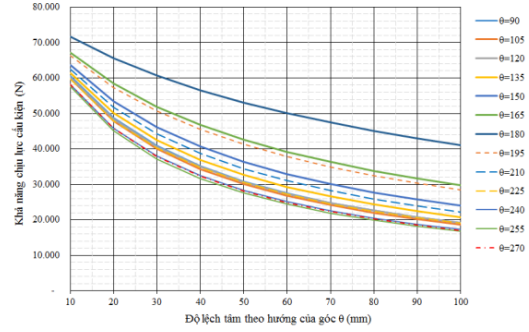
d (mm)	Khả năng chịu lực cầu kiện (N)												
	$\theta = 90^\circ$	$\theta = 105^\circ$	$\theta = 120^\circ$	$\theta = 135^\circ$	$\theta = 150^\circ$	$\theta = 165^\circ$	$\theta = 180^\circ$	$\theta = 195^\circ$	$\theta = 210^\circ$	$\theta = 225^\circ$	$\theta = 240^\circ$	$\theta = 255^\circ$	$\theta = 270^\circ$
10	73,483	72,754	73,522	75,822	79,770	85,559	93,447	84,363	77,782	73,301	70,634	69,608	70,161
20	56,880	56,045	56,990	59,821	64,891	72,890	85,038	71,180	62,310	56,751	53,602	52,406	53,005
30	46,413	45,602	46,561	49,441	54,752	63,573	78,119	61,641	52,029	46,338	43,217	42,043	42,606
40	39,205	38,449	39,371	42,149	47,380	56,411	72,306	54,396	44,684	39,169	36,213	35,109	35,623
50	33,938	33,239	34,110	36,740	41,770	50,722	67,341	48,696	39,167	33,927	31,167	30,142	30,609
60	29,920	29,274	30,092	32,565	37,356	46,089	63,043	44,090	34,868	29,926	27,358	26,407	26,833
70	26,754	26,156	26,923	29,244	33,789	42,240	59,282	40,287	31,423	26,771	24,379	23,497	23,887
80	24,193	23,639	24,358	26,540	30,846	38,990	55,960	37,092	28,559	24,219	22,186	21,165	21,525
90	22,081	21,564	22,240	24,294	28,377	36,208	53,002	34,371	26,243	22,112	20,021	19,254	19,587
100	20,308	19,824	20,461	22,399	26,275	33,799	50,350	32,023	24,246	20,342	18,379	17,660	17,970

Bảng 5. Khả năng chịu lực của cầu kiện dài 2,0 m

d (mm)	Khả năng chịu lực cầu kiện (N)												
	$\theta = 90^\circ$	$\theta = 105^\circ$	$\theta = 120^\circ$	$\theta = 135^\circ$	$\theta = 150^\circ$	$\theta = 165^\circ$	$\theta = 180^\circ$	$\theta = 195^\circ$	$\theta = 210^\circ$	$\theta = 225^\circ$	$\theta = 240^\circ$	$\theta = 255^\circ$	$\theta = 270^\circ$
10	60,476	59,742	60,037	61,351	63,705	67,145	71,722	66,422	62,449	59,705	58,105	57,602	58,195
20	48,706	47,866	48,339	50,140	53,408	58,413	65,571	57,342	51,681	47,990	45,893	45,187	45,823
30	40,791	39,974	40,528	42,498	46,124	51,892	60,642	50,639	44,214	40,212	37,986	37,216	37,809
40	35,098	34,336	34,921	36,921	40,653	46,782	56,552	45,434	38,690	34,640	32,429	31,652	32,190
50	30,804	30,101	30,690	32,658	36,375	42,644	53,074	41,249	34,421	30,441	28,301	27,543	28,030
60	27,450	26,801	27,381	29,289	32,930	39,212	50,065	37,801	31,016	27,159	25,111	24,382	24,824
70	24,756	24,156	24,720	26,557	30,093	36,312	47,426	34,904	28,233	24,521	22,570	21,874	22,278
80	22,545	21,987	22,533	24,294	27,712	33,826	45,084	32,431	25,914	22,353	20,498	19,835	20,206
90	20,696	20,177	20,703	22,390	25,685	31,669	42,988	30,295	23,950	20,539	18,776	18,144	18,488
100	19,129	18,643	19,149	20,764	23,937	29,777	41,098	28,428	22,266	18,998	17,321	16,720	17,039



Hình 12. Khả năng chịu lực cầu kiện chịu nén-uốn chiều dài $L = 1,0$ m



Hình 13. Khả năng chịu lực cầu kiện chịu nén-uốn chiều dài $L = 2,0$ m

Nhận xét: Khi độ lệch tâm càng lớn thì khả năng chịu lực của cầu kiện càng giảm do mô men được tạo ra bởi tải trọng lệch tâm càng lớn. Mặt khác khả năng chịu lực của cầu kiện chịu nén lệch tâm tạo ra mô men gây nén bản mép cao hơn trung bình 1,03 lần khi mô men gây kéo bản mép của tiết diện và đạt giá trị lớn nhất khi tải trọng trực chỉ gây ra mô men uốn đối với trục khỏe (trục x).

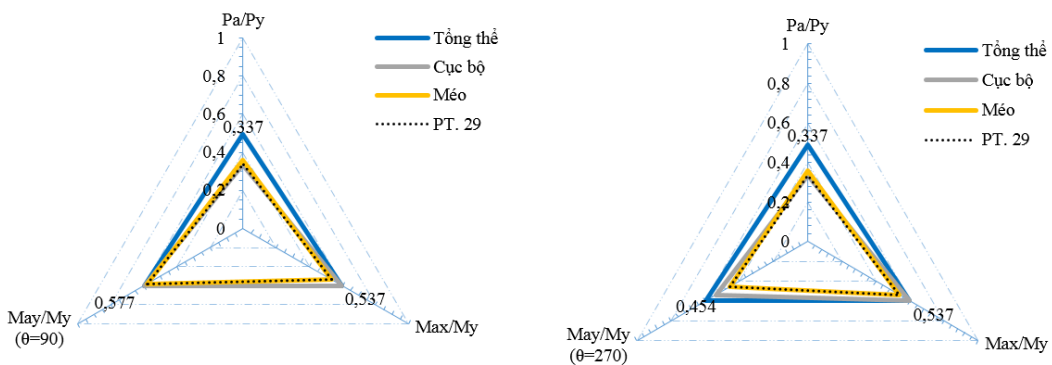
4.3. Biểu đồ tương tác của cầu kiện

Từ kết quả trên ta xây dựng được các biểu đồ tương tác trong không gian 3 chiều theo các biến P_a - M_{ax} - M_{ay} của phương trình tương tác (29). Kết quả được thể hiện ở Bảng 6.

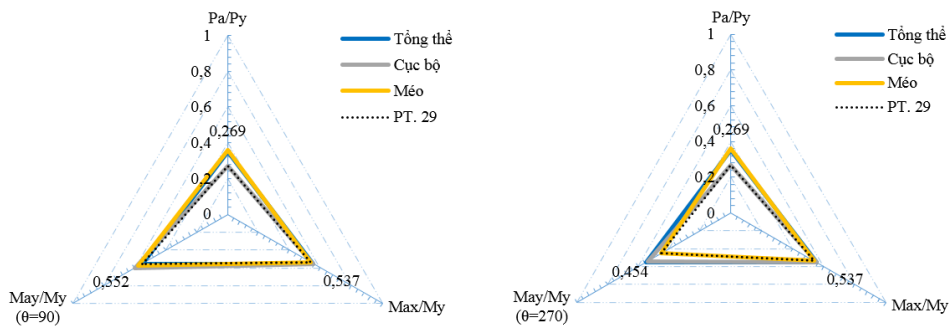
Bảng 6. Các tỷ số tính toán

Chiều dài	Tỷ số tải trọng dọc trục P_a/P_y			Tỷ số mô men uốn M_{ax}/M_y			Tỷ số mô men uốn M_{ay}/M_y ($\theta = 90^\circ$)			Tỷ số mô men uốn M_{ay}/M_y ($\theta = 270^\circ$)		
	Tổng thể	Cục bộ	Méo	Tổng thể	Cục bộ	Méo	Tổng thể	Cục bộ	Méo	Tổng thể	Cục bộ	Méo
$L = 1,0$ m	0,493	0,337	0,360	0,599	0,599	0,537	0,599	0,599	0,577	0,599	0,539	0,454
$L = 2,0$ m	0,350	0,269	0,360	0,552	0,552	0,537	0,552	0,599	0,577	0,552	0,539	0,454
$L = 3,0$ m	0,207	0,189	0,360	0,417	0,417	0,537	0,417	0,528	0,577	0,417	0,495	0,454
$L = 4,0$ m	0,125	0,125	0,360	0,261	0,261	0,537	0,261	0,438	0,577	0,261	0,436	0,454
$L = 5,0$ m	0,085	0,085	0,360	0,174	0,174	0,537	0,174	0,340	0,577	0,174	0,340	0,454

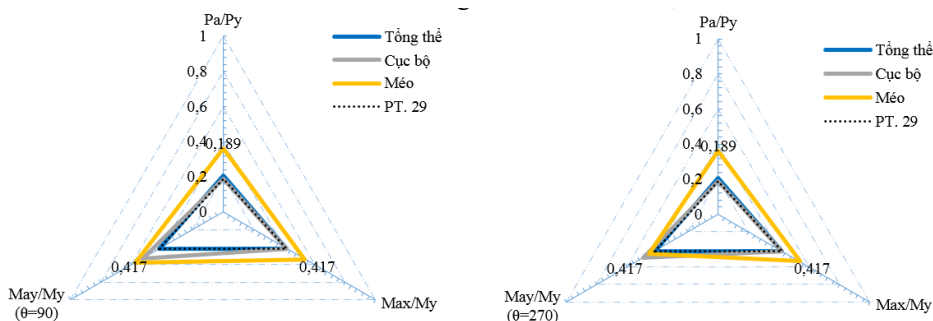
Kết quả thể hiện bằng biểu đồ tương tác ở Hình 14–18.



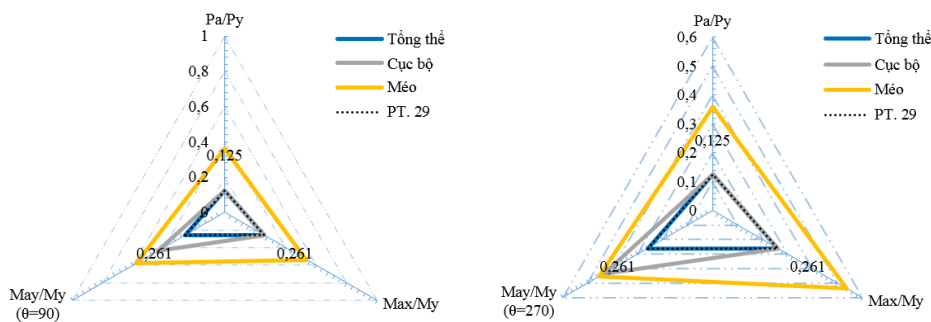
Hình 14. Biểu đồ tương tác cầu kiện dài 1,0 m



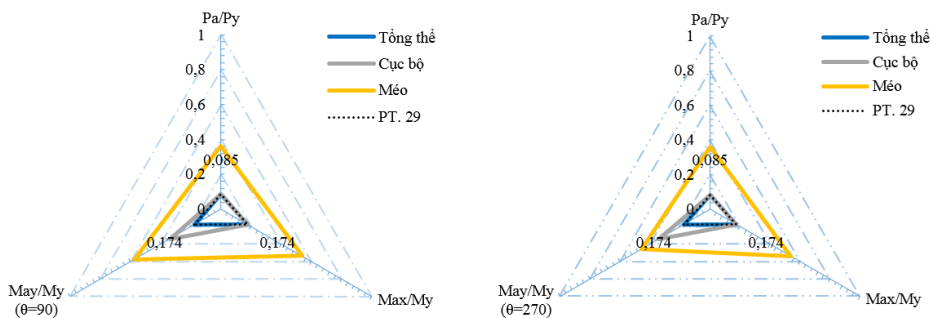
Hình 15. Biểu đồ tương tác cầu kiện dài 2,0 m



Hình 16. Biểu đồ tương tác cầu kiện dài 3,0 m



Hình 17. Biểu đồ tương tác cầu kiện dài 4,0 m



Hình 18. Biểu đồ tương tác cầu kiện dài 5,0 m

Nhận xét: Cầu kiện ngắn (1,0 m) và cầu kiện dài trung bình ($2,0 \div 3,0$ m) bị mất ổn định do mất ổn định cục bộ và mất ổn định méo; cầu kiện dài ($4,0 \div 5,0$ m) bị mất ổn định do mất ổn định tổng thể.

5. Kết luận

Dựa trên kết quả nghiên cứu, nhóm tác giả đưa ra một số kết luận sau:

- Việc sử dụng phương pháp phân tích trực tiếp trong thiết kế cầu kiện thép tạo hình nguội chịu nén-uốn theo Tiêu chuẩn Mỹ AISI S100-16 [4], với sự hỗ trợ của phần mềm CUFSM trong phân tích mất ổn định của tiết diện rất cần thiết và thiết thực phục vụ công tác nghiên cứu, thiết kế kết cấu. Các ví dụ tính toán được đưa ra để xác định khả năng chịu lực của cầu kiện thép tạo hình nguội chịu nén-uốn có chiều dài khác nhau. Kết quả tính toán bằng giải tích được so sánh với kết quả tính toán bằng phương pháp số khi sử dụng phần mềm CUFSM để đánh giá độ tin cậy của phương pháp số. Mặt khác, việc áp dụng phần mềm CUFSM để tính toán đặc trưng hình học và ổn định cầu kiện thép tạo hình nguội sẽ tạo ra sự thay đổi lớn về công cụ tính toán, đem lại nhiều lợi ích, thuận tiện cho việc nghiên cứu và cho thực hành thiết kế kết cấu công trình, đặc biệt khi áp dụng tính toán cho các cầu kiện chịu nén-uốn.

- Khảo sát ảnh hưởng của tải trọng nén dọc trục lệch tâm trên tiết diện với cầu kiện có chiều dài khác nhau ta thấy rằng khi độ lệch tâm càng lớn thì khả năng chịu lực của cầu kiện càng giảm do mô men được tạo ra bởi tải trọng đặt lệch tâm càng lớn. Mặt khác khả năng chịu lực của cầu kiện chịu nén-uốn mà có mô men gây nén bản mép cao hơn trung bình 1,03 lần khi có mô men gây kéo bản mép của tiết diện và đạt giá trị lớn nhất khi tải trọng trục chỉ gây ra mô men uốn đối với trục khỏe (trục x). Cầu kiện ngắn (1,0 m) và cầu kiện có chiều dài trung bình ($2,0 \div 3,0$ m) có xu hướng bị mất ổn định do mất ổn định cục bộ và mất ổn định méo; cầu kiện dài ($4,0 \div 6,0$ m) có xu hướng bị mất ổn định do mất ổn định tổng thể.

Tài liệu tham khảo

- [1] Cường, B. H. (2010). [Tính toán các đặc trưng hình học của tiết diện thanh thành mỏng hở](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD)-ĐH XD*, 4(2):16–28.
- [2] Cường, B. H. (2012). [Phân tích ổn định đàn hồi tâm và thanh thành mỏng bằng phương pháp dải hữu hạn](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD)-ĐH XD*, 6(1):12–23.
- [3] TCVN5575:2012. [Kết cấu thép-Tiêu chuẩn thiết kế](#). Hà Nội.
- [4] AISI S100-16 (2016). *North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*. American Iron and Steel Institute, Washington, DC.
- [5] AS/NZS 4600-2018 (2018). *Australian/New Zealand Standard TM Cold-formed steel structures*. The Council of Standards Australia.
- [6] Pekoz, T. B., Celebi, N. (1969). Torsional-flexural buckling of thin-walled sections under eccentric load. *Research Bulletin 69-1*, Ithaca, NY, Cornell University.
- [7] Pekoz, T. B., Winter, G. (1969). [Torsional-flexural buckling of thin-walled sections under eccentric load](#). *Journal of the Structural Division*, 95(5):941–963.
- [8] Rhodes, J., Harvey, J. M. (1977). Interaction behaviour of plain channel columns under concentric or eccentric loading. *Preliminary Report*, in *Stability of Steel Structures* Liege.
- [9] Loughlan, J. (1983). [The ultimate load sensitivity of lipped channel columns to column axis imperfection](#). *Thin-Walled Structures*, 1(1):75–96.
- [10] AISI S100-2007 (2007). *North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*. American Iron and Steel Institute, Washington, DC.
- [11] Hancock, G. J., Kwon, Y. B., Bernard, E. S. (1994). [Strength design curves for thin-walled sections undergoing distortional buckling](#). *Journal of Constructional Steel Research*, 31(2-3):169–186.

- [12] Peköz, T., Schafer, B. W. (1998). Direct strength prediction of cold-formed steel members using numerical elastic buckling solutions. *Fourteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, St. Louis, Missouri, University of Missouri–Rolla.
- [13] Schafer, B. W. (2002). [Local, distortional, and Euler buckling of thin-walled columns](#). *Journal of Structural Engineering*, 128(3):289–299.
- [14] Schafer, B. W. (2008). [The direct strength method of cold-formed steel member design](#). *Journal of Constructional Steel Research*, 64(7-8):766–778.
- [15] Chen, H., LaBoube, R., Schafer, B. (2007). [Direct strength method for cold-formed steel](#). *Structural Magazine*, 29–34.
- [16] Schafer, B. W. (2019). [Advances in the Direct Strength Method of cold-formed steel design](#). *Thin-Walled Structures*, 140:533–541.
- [17] Cheung, Y. K. (1976). *Finite Strip Method in structural analysis*. New York, NY: Pregamon Press, Inc.
- [18] Lysaght, Zed & Cees (2019). *User Guide for Design and Installation Professionals*.
- [19] American Iron and Steel Institute. *Cold-Formed Steel Design - Vol 1*. Steel Market Development Institute.
- [20] Schafer, B. W., Peköz, T. (1999). [Laterally braced cold-formed steel flexural members with edge stiffened flanges](#). *Journal of Structural Engineering*, 125(2):118–127.